第37卷第4期
2017年2月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.4
Feb.,2017

DOI: 10.5846/stxb201606211207
冯建新, 熊德成,邓飞,史顺增,许辰森,钟波元,陈云玉,陈光水.土壤增温、隔离降水及其交互作用对杉木幼苗细根生产的影响.生态学报,2017,37(4):1119-1127.
Feng J X, Xiong D C, Deng F,Shi S Z, Xu C S, Zhong B Y, Chen Y Y, Chen G S.Effects of soil warming and precipitation exclusion and their interaction on fine roots production of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) seedlings.Acta Ecologica Sinica,2017,37(4):1119-1127.

土壤增温、隔离降水及其交互作用对杉木幼苗细根生产的影响

冯建新[1,2], 熊德成[1,2], 邓　飞[1,2], 史顺增[1,2], 许辰森[1,2], 钟波元[1,2], 陈云玉[1,2], 陈光水[1,2,*]

1 福建师范大学地理科学学院, 福州　350007
2 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州　350007

摘要:为了揭示我国最重要的人工林树种杉木对全球变暖和降水格局改变的地下响应及其适应性,在福建省三明市陈大国有林场开展杉木(*Cunninghamia lanceolata*)幼苗土壤增温和隔离降水双因子试验,包括对照(CK)、土壤增温5 ℃(W)、隔离降水50%(P)和土壤增温+隔离降水(WP)4个处理,用微根管法探讨试验1a期间土壤增温、隔离降水及其交互作用对杉木幼苗细根生产量(以细根出生数量表征)的影响。双因素方差分析发现,土壤增温和隔离降水对细根总出生数量没有影响,但两者的交互作用则极显著。与CK相比,W细根总出生数量显著增加,而WP处理细根总出生数量则显著低于W处理和P处理。土壤增温、隔离降水与季节的重复测量方差分析发现,土壤增温×季节、隔离降水×季节对细根出生数量均有显著影响;与CK相比,W处理春季细根出生数量显著增加,P处理秋季细根出生数量显著增加,而WP处理夏季和冬季细根出生数量显著下降。土壤增温、隔离降水与径级的三因素方差分析表明,土壤增温×隔离降水×径级存在显著影响;0—1 mm径级细根出生数量W处理显著高于CK,但WP处理则显著低于W处理和P处理。土壤增温、隔离降水与土层的3因素方差分析表明,土壤增温、隔离降水与土层之间不存在显著的交互作用;仅在20—40 cm土层发现P处理细根出生数量显著高于CK。研究结果表明,土壤增温和隔离降水对杉木幼苗细根生产的影响存在显著的交互作用,这种交互作用还因不同的季节和径级而异。

关键词:土壤增温;隔离降水;细根生产量;出生数量

Effects of soil warming and precipitation exclusion and their interaction on fine roots production of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) seedlings

FENG Jianxin[1,2], XIONG Decheng[1,2], DENG Fei[1,2], SHI Shunzeng[1,2], XU Chensen[1,2], ZHONG Boyuan[1,2], CHEN Yunyu[1,2], CHEN Gunagshui[1,2,*]

1 *College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou* 350007, *China*
2 *State Key Laboratory of Subtropical Mountain Ecology (Funded by Ministry of Science and Technology and Fujian Province), Fujian Normal University, Fuzhou* 350007, *China*

Abstract: Changes in global warming are expected to have profound effects on precipitation. Root production plays a key role in ecosystem carbon, nutrient, and water cycling; however, the response of root production to soil warming and precipitation exclusion is not well understood. The aim of this study was to explore the below-ground responses and adaptability of the most important timber species in southern China, Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*), to global

基金项目:国家自然科学基金优秀青年基金项目(31422012); 国家973前期专项课题(2014CB460602); 福建省杰出青年基金项目滚动资助项目(2014J07005)

收稿日期:2016-06-21;　　**修订日期**:2016-08-24

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: gshuichen@163.com

warming and precipitation changes. A factorial experiment of soil warming (ambient, +5℃) and precipitation exclusion (ambient, −50%) was carried out in the Chenda State-owned Forest Farm in Sanming, Fujian Province. We measured changes in fine root production (fine root birth) after one year of soil warming and precipitation exclusion using the mini-rhizotron method. Results of two-way analysis of variance (ANOVA) showed that soil warming and precipitation exclusion had no significant effect on the total number of fine roots produced, whereas their interaction had a marked effect on the total number of fine roots produced. Compared to the control plots, the total number of fine roots produced increased significantly in the warmed soil plots, but decreased significantly in the warmed soil plus precipitation exclusion plots compared to the warmed plots and the precipitation exclusion plots, respectively. Repeated-measures ANOVA including soil warming, precipitation exclusion, and season showed that the interaction of soil warming and season, and the interaction of precipitation exclusion and season had significant effects on the number of fine roots produced. Compared to the control plots, the number of fine roots produced increased significantly in the warmed soil plots in the spring, and in the precipitation exclusion plots in the autumn, but decreased significantly in the warmed soil plus precipitation exclusion plots in the summer and winter. These results indicate that soil warming, precipitation exclusion, and their interaction influence the season of fine root production. A three-way ANOVA including soil warming, precipitation exclusion, and diameter class showed that the interaction of soil warming precipitation and diameter class had a significant effect on the number of fine roots produced, which was significantly higher in the soil warming treatment than in the control at 0-1 mm. However, the number of fine roots produced was significantly lower in the soil warming plus precipitation exclusion treatment than in the precipitation exclusion treatment and soil warming treatment, respectively. These results indicate that the effect of the interaction of soil warming and precipitation exclusion on the number of fine roots produced mainly occurred at 0—1 mm. The three-way ANOVA including soil warming, precipitation exclusion, and soil layer showed that the three-way interaction had no effect on the number of fine roots produced. Only the precipitation exclusion treatment resulted in a significantly higher number of fine roots than the control in the soil layer of 20—40 cm. This suggests that the interaction of soil warming and precipitation exclusion on the number of fine roots produced had similar effects at different soil layers. It is concluded that the interaction of soil warming and precipitation influenced root production through changing the fine root seasonal distribution and diameter class allocation, which may play important roles in the growth of Chinese fir.

Key Words: soil warming; precipitation exclusion; fine root production; fine root birth

据 IPCC(2013)报告,最近 130 年(1880—2012)全球海陆表面平均温度呈线性上升趋势,升高了 0.85 ℃;在许多中纬度和亚热带干旱地区平均降水可能会减少,而在许多中纬度湿润地区平均降水可能会增加[1]。在全球变暖背景下,全球平均呈干旱化的趋势,未来 30 至 90 年,降水量的减少和土壤蒸发量增加导致未来多数地区将面对严重和大面积的干旱[2],同时全球变暖及降水格局的改变将显著影响陆地生态系统的结构与功能[3-4]。因此研究土壤增温和降水减少对森林生态系统的响应对维持生态系统生产力和森林碳汇储量等方面具有一定的作用。

细根(≤ 2 mm)一般是根系最重要的部分[5],其生产力占森林净初级生产力的 3%—84%[6]。虽然细根生产在生态系统碳、养分和水循环过程中起着重要的作用,但是至今,我们还是不能科学解释细根生产如何响应多变的环境因子[7]。目前,有关土壤增温对细根生产的影响不一,很难发现一致的规律。Wan 等[8]通过增加温室空气温度的方法提升了土壤在 10 cm 深度的温度(+1.2 ℃),发现与对照相比,增温促进红枫(*Acer rubrum*)和糖枫(*Acer saccharum*)幼苗细根生产;Bai 等[9]对中国北方半干旱温带草原研究发现土壤增温降低了年均根生产量;此外,有研究显示在氮贫瘠的土壤,土壤增温对花旗松细根生产没有影响[10]。而大多数研究发现隔离降水试验会促进细根生产,例如 Joslin 等[11]对美国南部成熟阔叶林进行隔离降水试验发现与对照相比,隔离 33%降水量的样地会促进细根生产。但迄今为止,关于土壤增温与隔离降水交互试验对细根生产的影响鲜有报道,因此开展土壤增温和隔离降水对细根生产的影响研究是十分重要的,亦为全球变化下研究森林生态系统生产力提供科学依据。

我国湿润亚热带区域是全球同纬度少有的绿洲。该区是我国最重要的人工商品林基地,其中杉木林是我国最重要的人工林之一,面积占世界人工林面积的 6%(我国人工林面积占世界 1/3),在我国林业生产和森林碳吸存中发挥着重要的作用[12]。相比其它气候带,热带亚热带森林的增温和降水隔离的研究只有少数几例[13-14],因此,在我国亚热带区域开展相关研究是十分有意义的。为此本文以福建省三明市陈大国有林场杉木幼苗为研究对象,通过模拟增温和隔离降水试验来研究土壤增温与降水减少对杉木幼苗细根生产的影响,对我国湿润亚热带人工林生产力的科学预测和适应全球环境变化等有重要的指导意义。

1　试验区概况与研究方法

1.1　试验区概况

试验地位于福建三明森林生态系统与全球变化研究站陈大观测点,金丝湾森林公园陈大林业国有林场内(26°19′N,117°36′E)。平均海拔 300 m,属中亚热带季风气候,年均气温 19.1 ℃,年均降水量 1749 mm(主要集中在 3—8 月份),年均蒸发量 1585 mm,相对湿度 81%。

1.2　试验设计

试验采用完全随机设计,设置土壤增温×隔离降水双因子,共 4 个处理,即 1)对照(CK):不增温,不隔离降水;2)增温:增温 5 ℃,不隔离降水;3)隔离降水(WP):不增温,隔离降水 50%;4)增温+隔离降水(WP):增温 5 ℃,隔离降水 50%,小区面积 2 m×2 m,每个处理 5 个重复。试验小区四周采用 4 块 PVC 板(200 cm×70 cm 深)焊接而成,与周围土壤隔开,防止小区之间相互干扰。小区土壤取自附近的杉木林土壤,分层(0—10、10—20、20—70 cm)取回,剔除粗根、石块和其他杂物后,土壤分层混合均匀,并按 20—70、10—20 cm 和 0—10 cm 重填回 2 m×2 m 实验小区内,同时采用压实法调整土壤容重与原位土壤容重接近(表 1)。于 2013 年 10 月安装加热电缆(所有小区都布设相同电缆),平行布设,深度为 10 cm,间距 20 cm,并在最外围环绕 1 圈,保证样地增温的均匀性。2013 年 11 月,每个 2 m×2 m 小区均匀种植 4 棵 1 年生 2 代半短侧枝杉木幼苗,平均高度为(25.7±2.52)cm,平均主干基径为(3.35±0.48)cm,杉木位置均处于两条电缆线之间。在每个小区中的两棵杉木幼苗正下方以 45°斜角布两根长 90 cm 的微根管用以监测杉木细根生长和死亡动态。2014 年 3 月在样地小区高处每隔 0.05 m 安放 0.05 m×5 m 的透明 U 型管,均匀铺满隔离试验小区,以隔离 50%的降水(试验期间总降水量为 1994.2 mm)。样地布设完成后开始通电增温(2014 年 3 月)。

表 1　不同深度土壤重填前后容重

Table 1　Soil bulk density before and after backfilling

项目 Item	土层 Soil layer/cm					
	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60
原位土壤 In situ soil/(g/cm^3)	1.04	1.21	1.23	1.28	1.29	1.40
回填后土壤 Backfilling soil/(g/cm^3)	1.05	1.13	1.29	1.40	1.41	1.31

1.3　根系影像采集和数据采集

本研究从 2014 年 3 月起至 2015 年 3 月对细根进行了为期 1 年的连续性观测。于每月上旬和下旬(间隔大约 15d)使用微根管影像成像系统(美国 Bartz 技术公司生产)对细根生长过程进行影像收集,在 1d 内完成每次影像的收集工作。图片收集后带回实验室使用 Rootfly 图像分析软件对其进行处理,并获得各影像中细根直径、细根长度以及每张影像细根数量等数据。同时鉴别活根与死根:白色根和棕色根定义为活根,黑色、皮层脱落或表皮褶皱的根定义为死根[15]。细根生产量用影像中细根出生数量作为指标。

1.4　数据处理与分析

试验观测期从 2014 年 3 月至 2015 年 3 月,依据亚热带气候条件,将 3、4、5 月份划分为春季;将 6、7、8 月份划分为夏季;将 9、10、11 月份划分为秋季;将 12、1、2 月份划分为冬季。

采用双因素 ANOVA 检验土壤增温、隔离降水对每根管细根 1 年出生数量的影响;采用重复测量 ANOVA

检验土壤增温、隔离降水、季节对每根管细根出生数量的影响;采用三因素 ANOVA 检验土壤增温、隔离降水、径级或土层对每根管细根出生数量的影响。采用单因素方差分析和 LSD 检验各处理间的每根管细根出生数量差异。所有的统计分析均在 SPSS 19.0 软件上进行,显著性水平设定为 $P=0.05$。

2 结果

2.1 土壤温度和水分

增温对土壤温度和水分的影响达到极显著水平($P<0.01$),增温与隔离降水的交互作用对土壤温度和水分没有影响($P>0.05$),而隔离降水对土壤水分的影响达到极显著水平($P<0.01$),对土壤温度没有影响($P>0.05$)(表 2)。试验处理一年期间,CK、W、P、WP 的土壤平均温度和含水量分别为(21.56±6.74)℃、(23.33±3.23)%,(26.77±6.75)℃、(18.96±3.54)%,(22.35 ±6.10)℃、(20.02±4.09)%,(26.93±6.01)℃、(16.05±3.85)%。与 CK 相比,W 和 WP 的土壤温度显著增加($P<0.05$),P 的土壤温度没有差异($P>0.05$);W、P 和 WP 的土壤含水量则显著下降($P<0.05$)(图 1)。

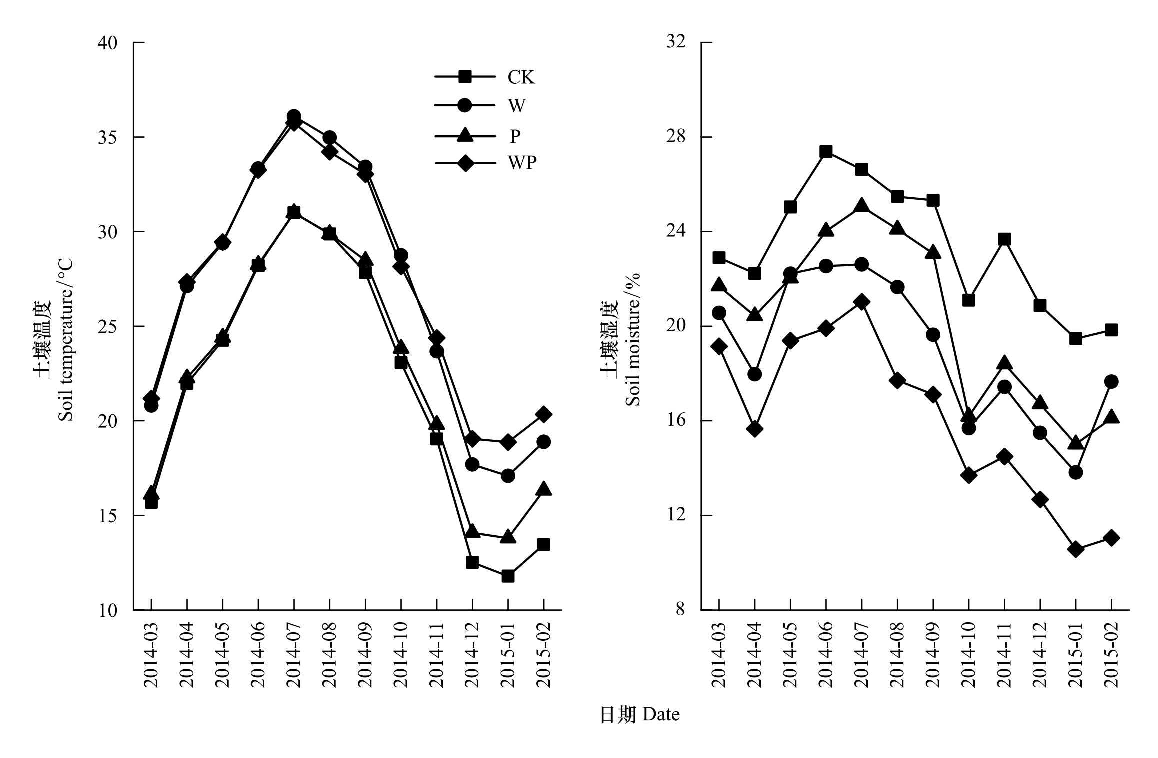


图 1 不同处理土壤温度和含水量的年变化(0—10 cm)

Fig.1 Annual changes of soil(0—10 cm) temperature and moisture under different treatments

CK,对照 control;W,土壤增温;P,隔离降水;WP,土壤增温+隔离降水

表 2 土壤增温和隔离降水及其交互作用对土壤温度和含水量、细根总出生数量影响的双因素方差分析表

Table 2 Two-way ANOVA on the effects of soil warming, precipitation exclusion and their interaction on soil temperature and moisture, total number of fine roots produced

因子 Factors	*P*		
	土壤温度 Soil temperature/℃	土壤湿度 Soil moisture/%	每根管细根 1 年总出生数量/条 Total number of fine roots produced/(条管$^{-1}$ a^{-1})
W	<0.001	<0.001	0.639
P	0.563	<0.001	0.341
W×P	0.706	0.685	0.002

W,土壤增温 Soil warming; P,隔离降水 Precipitation exclusion; W×P,土壤增温与隔离降水的交互作用 Interaction of soil warming and precipitation exclusion

2.2 细根总出生数量

增温和隔离降水对细根总出生数量没有影响(P>0.05),而增温与隔离降水的交互作用对细根总出生数量的影响达到极显著水平(P<0.01)(表 2)。在没有增温情况下,P 处理与 CK 的细根总出生数量没有显著差异(P>0.05);而在增温情况下,WP 处理的细根总出生数量显著低于 W 处理(P<0.05)。在没有隔离降水情况下,W 处理比 CK 的细根总出生数量显著增加(P<0.05);在隔离降水情况下,WP 处理的细根总出生数量显著低于 P 处理(P>0.05)(图 2)。

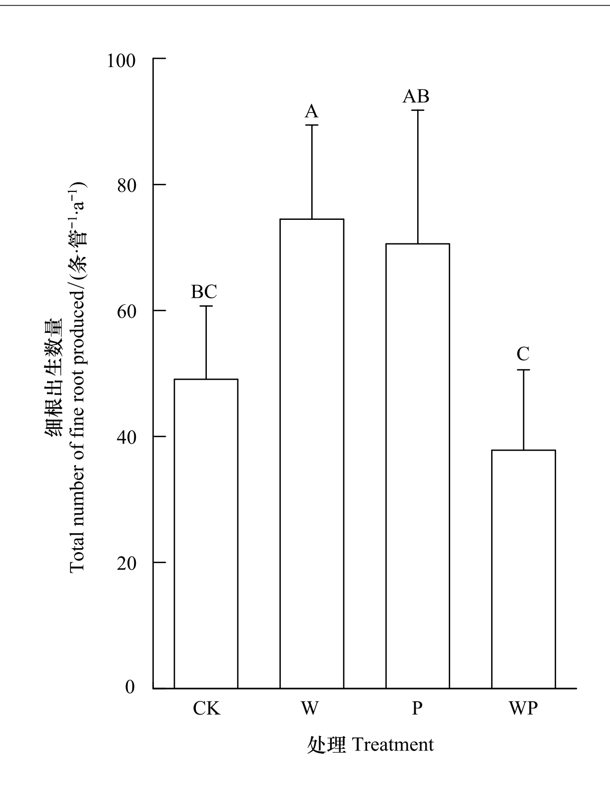


图 2　不同处理每根管细根一年总出生数量

Fig.2　Total number of fine roots produced per tube one year under different treatments

CK: 对照 control; W: 土壤增温 soil warming; P: 隔离降水 precipitation exclusion; WP: 土壤增温+隔离降水 soil warming plus precipitation exclusion;不同大写字母表示不同处理差异显著,图中数据为平均值±标准差

2.2 细根出生数量的季节动态

季节、增温与季节的交互作用、隔离降水与季节的交互作用对细根出生数量的影响达到极显著水平(P<0.01);而土壤增温、隔离降水、季节三者的交互作用对细根出生数量没有影响(P>0.05)(表 3)。在春季,W 处理的细根出生数量显著高于 CK 和其它处理的细根出生数量(P<0.05),而其它处理之间则无显著差异(P>0.05);在夏季,WP 处理的细根出生数量显著低于 CK(P<0.05),而其他处理之间的细根出生数量没有显著差异(P>0.05);在秋季,P 处理的细根出生数量显著高于 CK 和 W 处理(P<0.05),而其它处理之间则无显著差异(P>0.05);在冬季,WP 处理的细根出生数量显著低于 CK 和 P 处理(P<0.05),而其它处理之间无显著差异(P>0.05)(图 3)。不同处理细根出生的季节模式有一定差异。CK 夏季的细根出生数量显著高于其他季节(P<0.05);W 处理春季的细根出生数量显著高于其他季节(P<0.05);P 处理秋季细根出生数量显著高于其他季节(P<0.05);WP 处理秋季的细根出生数量则显著高于夏季和冬季(P<0.05)(图 3)。

表 3　土壤增温、隔离降水、季节对细根出生数量影响的重复测量方差分析的 *P* 值

Table 3　P value of repeated measures ANOVA on the effects of soil warming, precipitation exclusion, season on total number of fine roots produced

	因子 Factors						
	W	P	S	W×P	W×S	P×S	W×P×S
每根管细根 1 年出生数量/条 Total number of fine roots produced/(条管$^{-1}$ a^{-1})	0.639	0.341	0.001	0.002	0.005	0.001	0.074

S: 季节 Season; W×S: 土壤增温与季节的交互作用 Interaction of soil warming and season; P×S: 隔离降水与季节的交互作用 Interaction of precipitation exclusion and season; W×P×S: 土壤增温、隔离降水和季节三者的交互作用 Interaction of soil warming, precipitation exclusion and season

2.3 细根出生数量的径级分配和垂直分布

径级以及土壤增温、隔离降水、径级三者的交互作用对细根出生数量的影响达到极显著水平(P<0.01),土壤增温与径级的交互作用、隔离降水与径级的交互作用对细根出生数量没有影响(P>0.05)(表 4)。在 0—1 mm 径级,W 处理细根出生数量显著高于 CK,WP 处理的细根出生数量则显著低于 W 处理和 P 处理。而 1—2 mm 径级的细根出生数量在各处理间均无显著差异(图 3)。各处理的 0—1 mm 径级细根出生数量仅占

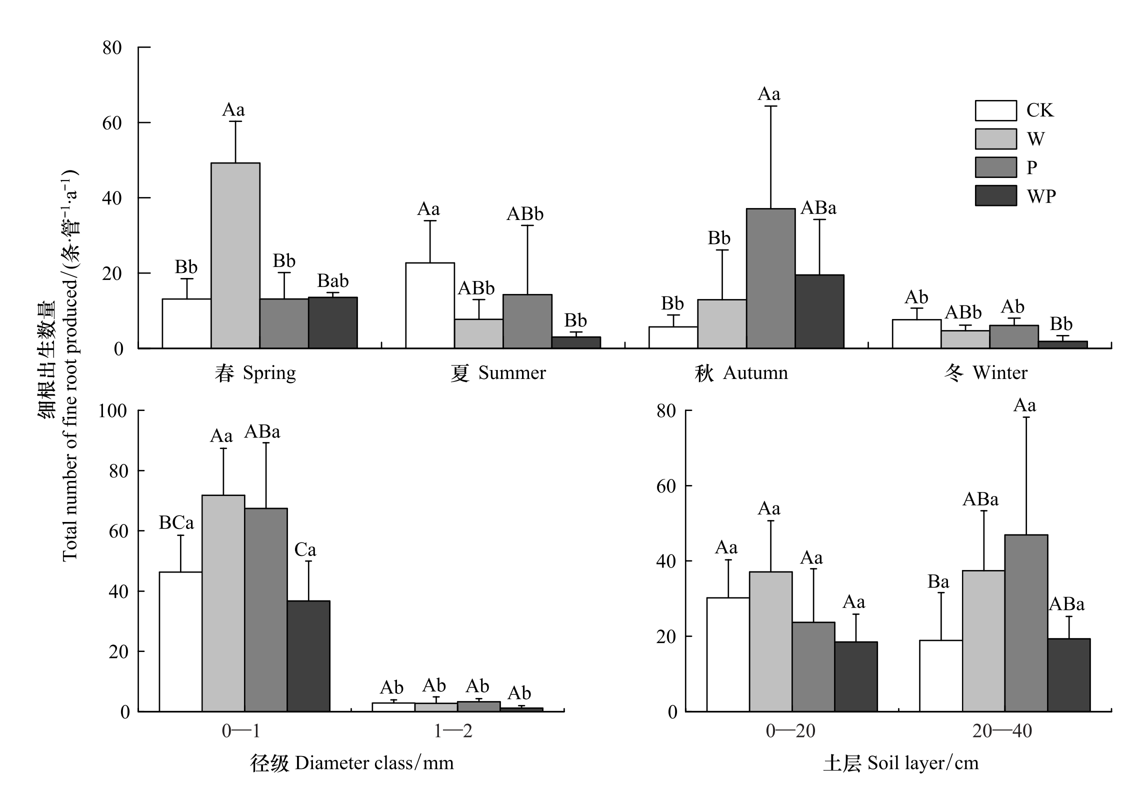


图 3 不同季节、径级、土层每根管细根出生数量

Fig.3 Total number of fine roots produced per tube under different season, diameter class and soil layer

不同大写字母表示不同处理差异显著,不同小写字母表示同一处理不同季节、径级、土层差异显著;图中数据为平均值±标准差

总细根出生数量的绝大部分(CK 为 94%,W 为 96%,P 为 95%,WP 为 97%)(图 3)。

表 4 土壤增温、隔离降水、径级对细根出生数量影响的三因素方差分析的 *P* 值

Table 4 P value of three-way ANOVA on the effects of soil warming, precipitation exclusion, diameter class on total number of fine roots produced

	因子 Factors						
	W	P	D	W×P	W×D	P×D	W×P×D
每根管细根 1 年出生数量/条 Total number of fine roots produced/(条管$^{-1}$ a^{-1})	0.649	0.352	0.000	0.001	0.848	0.428	0.002

D: 径级 Diameter class; W×D: 土壤增温与径级的交互作用 Interaction of soil warming and diameter class; P×D: 隔离降水与径级的交互作用 Interaction of precipitation exclusion and diameter class; W×P×D: 土壤增温、隔离降水和径级三者的交互作用 Interaction of soil warming, precipitation exclusion and diameter class

土层、土壤增温与土层的交互作用、隔离降水与土层的交互作用以及土壤增温和隔离降水与土层三者的交互作用均对细根出生数量没有影响(P>0.05)(表 5),表明土壤增温、隔离降水的影响及两者之间的交互作用不因土层而异。在 0—20 cm 土层,各处理之间则无显著差异。而在 20—40 cm 土层,P 处理的细根出生数量显著高于 CK,而其他处理之间均无显著差异(图 3C)。

3 讨论

3.1 细根总出生数量

与 CK 相比,W 细根总出生数量显著增加,说明土壤增温促进细根生产,这与许多研究结果一致[16-19]。例如,Majdj 等[20]对瑞典北部的云杉(*Norway spruce*)进行增温和施肥交互试验,发现 1996 年 10 月至 1997 年 6 月增温样地和增温+施肥样地的细根生产量显著高于对照样地和施肥样地。造成土壤增温细根生产增加的

主要原因是土壤增温能促进土壤氮矿化[21],增加土壤氮有效性,从而有利于细根生产。虽然 P 处理比 CK 细根总出生数量更多,但未达到显著影响,可能是因为隔离降水试验时间才 1a,受到影响的持续时间短,而且本地区降水量丰富,即使隔离 50%降水量也可能遭受干旱的强度不大。然而根据最优分配理论,当水分成为植物生长的限制因素时,相对于植物地上部分的生长,应分配更多的碳水化合物和养分用于细根生长[22],之前相关研究也表明减少降水会促进细根生产,例如 Gaul 等[23]通过对德国东南的挪威云杉 6 周隔离降水试验发现在 6 周轻度干旱期间细根生产增加,主要原因是为了弥补干旱期间细根死亡量增加导致的细根生物量损失。本研究还显示与 W 处理和 P 处理相比,WP 处理细根总出生数量显著降低。造成这种现象的原因是同时土壤增温和隔离降水时加剧了土壤的干旱程度,可能会影响植物光合作用导致减少地下根系生长碳的供应,进而减少细根生产[24]。

表 5　土壤增温、隔离降水、土层对细根出生数量影响的三因素方差分析的 P 值表

Table 5　P value of three-way ANOVA on the effects of soil warming, precipitation exclusion, soil layer on total number of fine roots produced

	因子 Factors						
	W	P	L	W×P	W×L	P×L	W×P×L
每根管细根 1 年出生数量/条 Total number of fine roots produced/ (条管$^{-1}$ a^{-1})	0.748	0.509	0.570	0.016	0.639	0.134	0.145

L,土层 Soil layer;W×L,土壤增温与土层的交互作用 Interaction of soil warming and diameter class;P×L,隔离降水与土层的交互作用 Interaction of precipitation exclusion and diameter class;W×P×L,土壤增温、隔离降水和土层三者的交互作用 Interaction of soil warming, precipitation exclusion and diameter class

3.2　细根出生数量的季节动态

本研究发现,CK 的杉木幼苗细根出生数量在夏季和春季最多,秋季最少,这与前人的研究结果一致,如 Hendrick 等[25]通过微根管技术对美国北方硬阔叶林研究表明,细根生产在春末和夏初最多、秋季最少;胡双成等[26]通过微根管技术对福建三明人促更新幼林研究发现人促更新幼林初期春季和夏季细根生产力比重大,秋季比重小。造成这种季节动态的原因可能是是早春土温回升快,降水量较多,土壤含水量增加以及之前储存的碳水化合物供给均有利于根系的大量生长[27],夏季树木固定的光合产物相对更多,有大量的光合产物分配到地下,满足了细根生长对碳的需求[28],秋季细根开始减少与降水量减少、温度的下降,以及分配给细根的碳水化合物减少有关[25]。与 CK 相比,W 处理春季细根出生数量显著增加,主要与 W 处理土壤温度较高,养分矿化增强以及春季土壤水分有效性较高有关(图 1)。P 处理与 CK 相比,秋季细根出生数量显著增加。这可能是由于与秋季 P 处理的土壤含水量与 CK 相比下降比较明显(图 1),从而诱发了 P 处理的杉木幼苗增加细根生产以获取土壤水分。WP 处理与 CK 相比夏季细根出生数量显著降低的原因主要与土壤温度过高,土壤含水量低有关;而 WP 处理与 CK 相比冬季细根出生数量显著降低,主要原因是因为,与 CK 相比,WP 处理冬季的土壤含水量极低,降低了苗木的光合作用,分配给地下的碳水化合物减少,同时冬季土壤温度仍然较高,细根呼吸消耗增加,从而综合导致可用以细根生产的碳水化合物很少。

3.3　细根出生数量的径级分配和垂直分布

研究结果显示,土壤增温、隔离降水与径级的交互作用对细根出生数量的影响达到显著水平,而且表明土壤增温与隔离降水的交互作用对细根出生数量的影响主要发生在 0—1 mm 径级。这是因为 0—1 mm 细根是吸收水分和养分的主要器官,是最幼嫩(未木质化)的部分,同时维持成本高,因而其对土壤环境因子变化(如土壤养分、水分、温度)和光合产物的变化最为敏感。而 1—2 mm 细根主要起到运输作用,已较充分木质化,维持成本低,因而对土壤环境因子和植物生理生态的变化敏感性较小。各处理的 0—1 mm 细根出生数量占细根总出生数量都达到 90%以上,表明 0—1 mm 细根对细根生产的贡献最大。这与前人的研究一致[26,29],如黄锦学等[30]研究发现细柄阿丁枫和米槠天然林 0—1 mm 细根占总生产力的比重达到 90%以上。

本研究结果还显示,土壤增温与土层、隔离降水与土层,以及土壤增温、隔离降水与土层的交互作用均对

细根出生数量没有影响。这表明在不同土层,土壤增温、隔离降水及其交互作用对细根出生数量的均有相似的影响。不同处理的比较中,只发现 20—40 cm 土层中 P 处理细根出生数量显著高于 CK。这可能 20—40cm 土层的土壤环境因子影响有关。土壤表层土壤直接暴露于空气中,土壤水分蒸发快,不易受地下水分的补充,同时隔离降水进一步限制了水分的补充,从而诱发 P 处理的杉木幼苗细根向深层迁移以获取土壤水分。

4 结论

本研究结果显示:1)土壤增温和隔离降水对细根生产没有影响,但两者的交互作用则极显著;与 CK 相比,W 处理细根总出生数量显著增加,而 WP 处理细根总出生数量则显著低于 W 处理和 P 处理;2)土壤增温×季节、隔离降水×季节对细根出生数量均有显著影响,说明土壤增温和隔离降水因改变土壤水热条件而改变了细根生产的季节;3)土壤增温×隔离降水×径级对细根出生数量存在显著影响,土壤增温与隔离降水的交互作用主要发生在 0—1 mm 径级;4)土壤增温、隔离降水与土层之间不存在显著的交互作用,这表明各处理对细根出生数量的影响不随土层而异。可见细根生产对土壤增温与隔离降水的交互作用的响应更多地通过改变细根生产季节和径级分配,从而对杉木幼苗生长产生影响。

参考文献(References):

[1] IPCC.Climate change 2013:The physical science basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.Cambridge:Cambridge University Press, 2013.

[2] Dai A G. Increasing drought under global warming in observations and models. Nature Climate Change, 2013, 3(1): 52-58.

[3] Aronson E L, McNulty S G. Appropriate experimental ecosystem warming methods by ecosystem, objective, and practicality. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(11): 1791-1799.

[4] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, Newkirk K, Lux H, Bowles F P, Catricala C, Magill A, Ahrens T, Morrisseau S. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. Science, 2002, 298(5601): 2173-2176.

[5] Liu C, Xiang W H, Lei P F, Deng X W, Tian D L, Fang X, Peng C H. Standing fine root mass and production in four Chinese subtropical forests along a succession and species diversity gradient. Plant and soil, 2014, 376(1-2): 445-459.

[6] 王瑞丽, 程瑞梅, 肖文发, 封晓辉, 刘泽彬, 王晓荣. 森林细根生产和周转的影响因素. 世界林业研究, 2012, 25(1): 19-24.

[7] Pritchard S G, Rogers H H. Spatial and temporal deployment of crop roots in CO_2-enriched environments. New Phytologist, 2000, 147(1): 55-71.

[8] Wan S Q, Norby R J, Pregitzer K S, Ledford J, O'Neill E G. CO_2 enrichment and warming of the atmosphere enhance both productivity and mortality of maple tree fine roots. New Phytologist, 2004, 162(2): 437-446.

[9] Bai W M, Wan S Q, Niu S L, Liu W X, Chen Q S, Wang Q B, Zhang W H, Han X G, Li L H. Increased temperature and precipitation interact to affect root production, mortality, and turnover in a temperate steppe: implications for ecosystem C cycling. Global change biology, 2010, 16(4): 1306-1316.

[10] Johnson M G, Rygiewicz P T, Tingey D T, Phillips D L. Elevated CO_2 and elevated temperature have no effect on Douglas-fir fine-root dynamics in nitrogen-poor soil. New Phytologist, 2006, 170(2): 345-356.

[11] Joslin J D, Wolfe M H. Impacts of water input manipulations on fine root production and mortality in a mature hardwood forest. Plant and Soil, 1998, 204(2): 165-174.

[12] Chen G S, Yang Z J, Gao R, Xie J S, Guo J F, Huang Z Q, Yang Y S. Carbon storage in a chronosequence of Chinese fir plantations in southern China. Forest Ecology and Management, 2013, 300:68-76.

[13] Wu Z T, Dijkstra P, Koch G W, Peñuelas J, Hungate B A. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation. Global Change Biology, 2011, 17(2): 927-942.

[14] 陈云玉, 熊德成, 邓飞, 许辰森, 冯建新, 史顺增, 钟波元, 陈光水. 土壤增温与氮添加对杉木幼苗细根径级根长分布的影响. 应用生态学报, 2016,27(4): 1009-1014.

[15] Wells C E, Glenn D M, Eissenstat D M. Changes in the risk of fine-root mortality with age: a case study in peach, *Prunus persica* (Rosaceae). American Journal of Botany, 2002, 89(1): 79-87.

[16] Forbes P J, Black K E, Hooker J E. Temperature-induced alteration to root longevity in Lolium perenne. Plant and Soil, 1997, 190(1): 87-90.

[17] Fitter A H, Self G K, Brown T K, Bogie D S, Graves J D, Benham D, Ineson P. Root production and turnover in an upland grassland subjected to

artificial soil warming respond to radiation flux and nutrients, not temperature. Oecologia, 1999, 120(4): 575-581.

[18] King J S, Pregitzer K S, Zak D R. Clonal variation in above-and below-ground growth responses of *Populus tremuloides* Michaux: influence of soil warming and nutrient availability. Plant and Soil, 1999, 217(1-2): 119-130.

[19] Tierney G L, Fahey T J, Groffman P M, Hardy J P, Fitzhugh R D, Driscoll C T, Yavitt J B. Environmental control of fine root dynamics in a northern hardwood forest. Global Change Biology, 2003, 9(5): 670-679.

[20] Majdi H, Öhrvik J. Interactive effects of soil warming and fertilization on root production, mortality, and longevity in a *Norway spruce* stand in Northern Sweden. Global Change Biology, 2004, 10(2): 182-188.

[21] Rustad L E, Campbell J L, Marion G M, Norby R J, Mitchell M J, Hartley A E, Cornelissen J H C, Gurevitch J. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. Oecologia, 2001, 126(4): 543-562.

[22] Bloom A J, Chapin F S, Mooney H A. Resource limitation in plants-an economic analogy. Annual review of Ecology and Systematics, 1985,16: 363-392.

[23] Gaul D, Hertel D, Borken W, Matzner E, Leuschner C. Effects of experimental drought on the fine root system of mature Norway spruce. Forest Ecology and Management, 2008, 256(5): 1151-1159.

[24] Niu S L, Wu M Y, Han Y, Xia J Y, Li L H, Wan S Q. Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe. New Phytologist, 2008, 177(1): 209-219.

[25] Hendrick R L, Pregitzer K S. The dynamics of fine root length, biomass, and nitrogen content in two northern hardwood ecosystems. Canadian Journal of Forest Research, 1993, 23(12): 2507-2520.

[26] 胡双成, 熊德成, 黄锦学, 邓飞, 陈云玉, 刘小飞, 陈光水. 福建三明米槠次生林在不同更新方式下的初期细根产量. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3259-3267.

[27] López B, Sabaté S, Gracia C A. Fine-root longevity of *Quercus ilex*. New Phytologist, 2001, 151(2): 437-441.

[28] Withington J M, Reich P B, Oleksyn J, Eissenstat D M. Comparisons of structure and life span in roots and leaves among temperate trees. Ecological Monographs, 2006, 76(3): 381-397.

[29] 黄锦学, 凌华, 杨智杰, 卢正立, 熊德成, 陈光水, 杨玉盛, 谢锦升. 中亚热带细柄阿丁枫和米槠群落细根的生产和死亡动态. 生态学报, 2012, 32(14): 4472-4480.